

FACULTÉ DE MÉDECINE DE PARIS

ANNÉE 1931

THÈSE

N°

POUR LE

DOCTORAT EN MÉDECINE

(Diplôme d'Etat)

PRÉSENTÉE PAR

Roger GOUGET

Diplômé de l'Institut de Médecine coloniale de Paris

Né à Paris le 8 Novembre 1904

ÉTUDE

de quelques nouvelles méthodes d'examen

des eaux souterraines

(en vue de leur utilisation dans l'alimentation)

Président de Thèse : M. le Professeur L. TANON

PARIS

IMPRIMERIE DE LA FACULTÉ DE MÉDECINE

JOUE & Cie, ÉDITEURS

15, RUE RACINE, 15

1931

THÈSE
POUR LE DOCTORAT
EN MÉDECINE

FACULTÉ DE MÉDECINE DE PARIS

ANNÉE 1931

THÈSE

N°

POUR LE

DOCTORAT EN MÉDECINE

(Diplôme d'Etat)

PRÉSENTÉE PAR

Roger GOUGET

Diplômé de l'Institut de Médecine coloniale de Paris

Né à Paris le 8 Novembre 1904

ÉTUDE

de quelques nouvelles méthodes d'examen

des eaux souterraines

(en vue de leur utilisation dans l'alimentation)

Président de Thèse : M. le Professeur L. TANON

PARIS

IMPRIMERIE DE LA FACULTÉ DE MÉDECINE

JOUE & Cie, ÉDITEURS

15, RUE RACINE, 15

1931

LE DOYEN. M. BALTHAZARD

I. — PROFESSEURS

MM.

Anatomie	ROUVIERE.
Anatomie médico-chirurgicale et chirurgie expérimentale.	GRÉGOIRE.
Physiologie	BINET.
Physique médicale	STROHL.
Chimie médicale	DESGREZ.
Bactériologie	LEMIERRE.
Parasitologie et histoire naturelle médicale	BRUMPT.
Pathologie et thérapeutique générales	BAUDOUIN.
Pathologie médicale	CLERC.
Pathologie chirurgicale	LENORMANT.
Anatomie pathologique	ROUSSY.
Histologie	CHAMPY.
Pharmacologie et matière médicale	TIFFENEAU.
Thérapeutique	LOEPER.
Hygiène et médecine préventive	TANON.
Médecine légale	BALTHAZARD.
Histoire de la médecine et de la chirurgie	MENÉTRIER.
Pathologie expérimentale et comparée	RATHERY.
Hydrologie thérapeutique et climatologie	Maurice VILLARET.
Clinique médicale	CARNOT.
	BEZANÇON.
	ACHARD.
	Marcel LABBÉ.
Hygiène et clinique de la première enfance	LEREBOULET.
Clinique des maladies des enfants	NOBECOURT.
Clinique des maladies mentales et des maladies de l'encéphale	
Clinique des maladies cutanées et syphilitiques	H. CLAUDE.
Clinique des maladies du système nerveux	GOUGEROT.
Clinique des maladies infectieuses	GUILLAIN.
	TEISSIER.
Clinique chirurgicale	DELBET.
	CUNéo.
	LEJARS.
	GOSSET.
Clinique ophtalmologique	TERRIEN.
Clinique urologique	LEGUEU.
	COUVELAIRE.
Clinique d'accouchements	BRINDEAU.
	JEANNIN.
Clinique gynécologique	J.-L. FAURE.
Clinique chirurgicale infantile et orthopédie	OMBRÉDANNE.
Clinique thérapeutique médicale	VAQUEZ.
Clinique oto-rhino-laryngologique	SEBILEAU.
Clinique thérapeutique chirurgicale	Pierre DUVAL.
Clinique propédeutique	SERGENT.
Clinique de la Tuberculose	Léon BERNARD.
Professeur sans chaire	MAUCLAIRE.



II. — AGRÉGÉS EN EXERCICE

MM.		MM.	
ALAJOUANINE.	Neurologie et psychiâtrie.	LEMAITRE.....	Oto-rhino-laryngologie.
N.....	Physiologie.	HUGUENIN.....	Anatomie pathologique.
AUBERTIN.....	Pathologie médicale.	LEVEUF.....	Pathologie chirurgicale.
BÉNARD (Henri)	Pathologie médicale.	LEVY-VALENSI.	Neuro-psychiâtrie.
SANNIÉ.....	Chimie biologique.	LIAN.....	Pathologie médicale.
BROCQ.....	Pathologie chirurgicale.	HAZARD.....	Pharmacologie.
BRULÉ.....	Pathologie médicale.	MILLOT.....	Histologie.
CADENAT.....	Pathologie chirurgicale.	MONDOR.....	Pathologie chirurgicale.
CATHALA.....	Pathologie médicale.	MOREAU.....	Pathologie médicale.
CHABROL.....	Pathologie médicale.	MOULONGUET.	Pathologie chirurgicale.
CHEVALLIER..	Pathologie médicale.	MOURE.....	Pathologie chirurgicale.
Gaudart-d'Allaines.	Pathologie chirurgicale.	MULON.....	Histologie.
DOGNON.....	Physique.	OBERLING.....	Anatomie pathologique.
DONZELOT.....	Pathologie médicale.	OLIVIER.....	Anatomie.
ECALLE.....	Obstétrique.	PIEDELIEVRE.	Médecine légale.
FEY.....	Urologie.	PORTES.....	Obstétrique.
GARNIER.....	Pathologie expérimentale.	QUENU.....	Pathologie chirurgicale.
GASTINEL.....	Bactériologie.	RICHET.....	Physiologie.
GATELIER.....	Pathologie chirurgicale.	SEZARY.....	Dermatologie et syphillographie.
GIROUD.....	Histologie.		
HARVIER.....	Pathologie médicale.	VALLERY - RADOT	
HOVELACQUE.	Anatomie.	(Pasteur)....	Pathologie médicale.
HUTINEL.....	Pathologie médicale.	VAUDESCAL...	Obstétrique.
JOANNON.....	Hygiène.	VELTER.....	Ophtalmologie.
LABBÉ (Henri).	Chimie biologique.	VERNE.....	Histologie.
LAROCHE (Guy)...	Pathologie médicale.	VIGNES.....	Obstétrique.

III. — AGRÉGÉS RAPPELÉS A L'EXERCICE

pour le service des examens

MM.		MM.	
BUSQUET.....	Pharmacologie.	NEVEU-LEMAIRE..	Parasitologie.
GUÉNIOT.....	Obstétrique.	RETTERER.....	Histologie.
LEQUEUX.....	Obstétrique.	ZIMMERN.....	Physique.
LEROUX	Anatomie pathologique.		

IV. — AGRÉGÉS CHARGÉS DE COURS DE CLINIQUE

à titre permanent

MM.		MM.	
ABRAMI	Clinique médicale.	HEITZ-BOYER .	Clinique chirurgie
CHIRAY	Clinique médicale.	MATHIEU	Clinique chirurgie
DEBRÉ	Clinique médicale.	MOCQUOT	Clinique chirurgie
DUVOIR	Clinique médicale.	PROUST	Clinique chirurgie
FIESSINGER. . .	Clinique médicale.	SCHWARTZ ...	Clinique chirurgie
LAIGNEL LAVASTINE. .	Clinique médicale.	LE LORIER ...	Clinique chirurgie
BASSET	Clinique chirurgicale.	LEVÉ-SOLAL ..	Clinique obstétric
CHEVASSU ...	Clinique chirurgicale.	METZGER	Clinique obstétric

V. — CHARGÉS DE COURS

MM.	
MAUCLAIRE, professeur sans chaire	Chargé du cours de chirurgie orthopédique c l'adulte pour les accidentés du travail, mutilés de guerre et les infirmes adultes.
FREY	Stomatologie.
CHAILLET-BERT	Education physique.
LEDOUX-LEBARD	Radiologie clinique.
WEILL-HALLÉ	Puériculture.

Par délibération en date du 9 décembre 1798, l'Ecole a arrêté que opinions émises dans les dissertations qui lui seront présentées, doivent considérées comme propres à leurs auteurs et qu'elle n'entend leur donner aucune approbation ni improbation.

A MES PARENTS

A MON FRERE

A MA SŒUR

Témoignage d'affection.

MEIS ET AMICIS

A MON MAITRE ET PRESIDENT DE THESE

MONSIEUR LE PROFESSEUR L. TANON

Professeur d'Hygiène à la Faculté de Médecine
de Paris ;

Médecin-Chef des Services Techniques d'Hygiène
de la Préfecture de Police.

Dont nous avons reçu le lumineux enseignement, et auquel nous sommes redevables du meilleur de nos connaissances en hygiène ; qui nous ayant donné l'idée de ce travail et favorisé de ses précieux avis, nous fait le plus grand honneur de présider cette thèse.

Nous lui en sommes infiniment reconnaissant et le prions de trouver ici l'expression de notre gratitude, de notre respectueux dévouement.

A MONSIEUR LE DOCTEUR NEVEU

Chef du Laboratoire des Epidémies à la Préfecture.

*Qui a bien voulu nous prodiguer
ses inappréciables conseils. et nous a
ouvert tout grand les portes de son
laboratoire.*

*Nous n'oublierons jamais son affa-
bilité et l'inaltérable complaisance
dont il a fait montre à notre égard.*

A MONSIEUR LE DOCTEUR M. CLERC

*Qui nous a donné en toute occasion
les marques d'une extrême bienveil-
lance.*

A MES MAITRES DANS LES HOPITAUX

INTRODUCTION

Soixante-quinze pour cent des agglomérations françaises ⁽¹⁾ s'adressent aux eaux souterraines, eaux de sources et eaux alluvionnaires pour alimenter leurs réseaux de distribution.

La connaissance des eaux souterraines est donc absolument nécessaire aujourd'hui à l'ingénieur sanitaire ⁽²⁾. Il y aura d'ordinaire à faire une comparaison judicieuse entre les eaux souterraines et les eaux de surface (rivières et lacs naturels ou artificiels), il faudra faire un choix d'après les avantages respectifs des unes et des autres. Si l'une des catégories fait défaut il faudra recourir à l'autre, et souvent on n'a pas trop des ressources de toutes deux réunies.

Toutes les grandes villes (F. Bordas et Jean Rivière, Paris nouveau. *Annales d'Hygiène publique industrielle et sociale*, octobre 1930) sont actuellement en présence du même problème à résoudre. A l'augmentation de la population, il faut répondre immé-

(1) GUILLERD. : Les qualités organoleptiques de l'eau. *Annales d'Hygiène*, août 1929.

(2) IMBEAUX ; Essai d'hydrogéologie. 1930.

diatement par une augmentation du volume d'eau potable et par une évacuation non moins importante du volume des eaux usées.

Paris, dont l'agglomération est d'environ trois millions d'habitants, consomme par jour 568.000 m³ d'eau de Marne, 744.000 m³ d'eau puisée en Seine. D'autre part, la Compagnie des Eaux puise dans la Marne 500.000 m³ pour les services de la banlieue. Soit un total de 1.812.000 m³ par jour. Soit, d'après Belgrand, plus de 60 % du débit de la Seine par basses eaux en été.

Mais on ne pourra continuer à prélever des quantités croissantes d'eau dans la Seine sous peine d'apporter, comme l'a déclaré le service spécial, une gêne bien sensible à la navigation.

M. Colmet-Daage a estimé dans un rapport officiel, qu'en 1960, il faudra pour Paris et les communes du département de la Seine, 5.600.000 m³ d'eau par jour. Or, les services municipaux ne disposent actuellement que de 1.812.000 m³ d'eau de rivière épurée et de 350.000 m³ d'eau de source, soit un total de 2.160.000 m³. Les Vals de Loire apporteront peut-être un million de m³ supplémentaire qui fera un total de 3.160.000 m³ d'eau en face d'un besoin de 5.600.000 m³, soit une différence en moins de 2.440.000 m³.

Une eau de rivière, souillée par le déversement de nombreux égouts, par une batellerie plus ou moins active, ne saurait, même après l'addition d'hypochlorite de soude, représenter sinon un idéal hygiénique, du moins une eau appétissante et saine,

La javellisation est un procédé de fortune et pas autre chose. L'eau traitée n'est évidemment pas immédiatement nocive, mais rien ne nous démontre que l'usage habituel d'un pareil breuvage ne provoque pas dans la suite des troubles dans l'organisme de ceux qui le consomment.

Etude de quelques nouvelles méthodes d'examen des eaux souterraines, en vue de leur utilisation dans l'alimentation

Le problème de l'alimentation en eau et son importance croissante sont liés intimement au développement des groupements humains et à leur évolution vers la vie civilisée.

L'homme primitif, probablement antérieur de milliers d'années ou de siècles à celui dont nous retrouvons les restes dans les cavernes, n'eut pas d'animaux domestiques. Il ne vivait que du produit de sa chasse et de fruits sauvages. Peu à peu, au bout de millénaires, il réussit à attirer et à élever un certain nombre de bêtes sans défense qui lui fournirent leur lait, leur toison et leur chair. A partir de ces jours son existence devint un peu moins précaire, un peu moins harassante. L'intolérable et quotidienne menace de la mort reculait. L'âge pastoral succédait à

l'âge angoissant de la chasse, de la pêche et de la faim sans rémission ⁽¹⁾.

L'accroissement du nombre des individus qui suivit cette augmentation de bien-être, les compétitions plus ardues pour la possession de terrains de pâture, les premiers essais de défrichement et de culture du sol amenèrent rapidement l'homme à abandonner la vie nomade. Il vint se fixer et construire ses premières huttes au voisinage des points d'eau.

C'est ainsi que les premiers villages prirent naissance autour des sources, lesquelles assuraient avec l'alimentation en eau de l'homme et du bétail, l'approvisionnement nécessaire aux multiples besoins créés par la civilisation commençante et il n'est pas douteux que des qualités comme la limpidité et la fraîcheur n'aient été appréciées dès l'origine de leur utilisation.

Le développement de certaines de ces premières agglomérations plus favorisées par leur situation géographique et les conséquences d'ordre économique qui purent en résulter, rendirent très vite insuffisant le point d'eau local et l'ingéniosité de l'homme dut s'employer à créer de nouveaux apports en eau.

Les civilisations anciennes ont rapidement inventé et perfectionné les moyens d'adduction de l'eau. Les ruines imposantes des ouvrages qui furent construits et les descriptions qui nous en sont conservées témoignent des travaux prodigieux qui furent entrepris pour répondre aux besoins des cités.

(1) MAETERLINK : La vie des fourmis.

Le fameux aqueduc de Siloé, à Jérusalem, véritable tunnel de 1.500 mètres de longueur, les grands puits de la vallée du Nil d'où l'eau était extraite par des manèges, en sont des exemples ⁽¹⁾.

Une réglementation intervenait dans le même temps pour l'usage de l'eau.

Chez les Grecs les sources sont élevées au rang de divinités et respectées comme telles.

Une loi de Solon règle l'usage des sources et puits publics; ceux-là seulement peuvent y puiser (deux fois par jour en quantité déterminée) qui justifient avoir fait des recherches infructueuses jusqu'à trente pieds de profondeur dans leur propre fonds.

Platon voulait qu'on n'allât pas puiser de l'eau chez un voisin avant d'avoir cherché dans son domaine en creusant jusqu'à l'argile si on n'aurait pas soi-même une source.

Aristote déclare qu'une bonne alimentation en eau est d'une importance capitale pour une ville. Aussi Athènes, au temps de sa splendeur (200.000 habitants), n'avait-elle pas moins de dix-huit conduites amenant des eaux.

Mais ce fut chez les Romains que l'art de dériver les sources atteignit son apogée. Après les premiers tâtonnements naquirent les travaux gigantesques qui font maintenant encore l'admiration des urbanistes.

La Rome primitive était dotée de sources et de cours d'eau assez nombreux. Les premiers Romains se sont contentés d'utiliser ces eaux plus ou moins

(1) DEBAUVE et IMBEAUX : Distributions d'eaux.

limoneuses et en particulier les sources qui jaillissent un peu partout dans le Forum. Ces eaux ne suffisaient pas aux besoins d'une ville comme Rome et l'on chercha de bonne heure à capter des sources très loin ⁽¹⁾.

Le premier aqueduc qui fut construit, l'Aqua Appia, en 312 avant J.-C., d'une longueur de 16 km. presque totalement souterrain; en 273 avant J.-C. nouvel aqueduc de 63 km., donnant 277.000 cm³; en 144 avant J.-C. aqueduc de Marcius Rex, de 91 km., amenant l'eau de la Sabine par un tunnel qui traversait les montagnes de Tivoli et par sept ponts qui franchissaient les vallées; en 126 avant J.-C. Aqua Tépula dont l'eau était légèrement tiède et venait des monts Albains. Au temps d'Auguste, les aqueducs qui viennent d'être étudiés ne suffirent plus à alimenter Rome. Il y avait en effet à cette époque 700 bassins, 105 fontaines, 130 châteaux d'eau et l'empereur venait d'ouvrir 170 bains gratuits pour le peuple; en 2 de notre ère il inaugure l'aqua Virgo œuvre d'Agrippa; cet aqueduc, restauré par Pie V en 1570, fournit actuellement encore l'eau cristalline de la fontaine de Trévi, des fontaines de la place d'Espagne et de la place Navona. La source de l'aqua Virgo émerge non loin de Salone sur la via Collatina. A cet endroit le sol est très marécageux, aussi Agrippa construisit-il à son émergence un véritable bassin de décantation. Quatre nouveaux aqueducs furent construits jusqu'en 226. On voit avec quelle abondance Rome était alimentée en eau de source.

(1) R. NEVEU : L'aménagement de Rome en eau potable dans l'antiquité. *Pro Médico*, n° 4, 1927.

Les Romains suivaient des règles essentielles pour capter et amener les eaux, à savoir ne pas capter les sources des plaines et couvrir les aqueducs pour que l'eau soit plus froide.

Les conduites étaient en pierre, en maçonnerie ou en brique, quelquefois en plomb.

Il y avait autour des sources un véritable périmètre de protection. Ceux qui détournaient ou souillaient les canalisations étaient sévèrement punis. Les citernes étaient non seulement de véritables réservoirs mais aussi et surtout de vastes chambres d'épuration.

L'évacuation des eaux usées était assurée par un réseau d'égouts très complet.

La législation et l'organisation des eaux à Rome étaient très complète et Agrippa, à qui avait été confiée la fonction de *curator perpétus Aquarum*, organisa un corps de 460 personnes chargées du service des eaux.

L'invasion des barbares, la transformation du monde civilisé, déterminèrent l'abandon ou la ruine des œuvres de l'antiquité, et il semble que le moyen-âge ignore les procédés les plus élémentaires de la distribution des eaux.

Les Arabes, qui avaient imaginé les tuyaux en poterie, semblent avoir seuls gardé les traditions de l'antiquité. Cependant il ne faut pas croire qu'à cette époque l'art ancien ait si complètement disparu; dans une mesure modeste mais réelle la pratique en était conservée dans les domaines seigneuriaux et surtout

dans les abbayes du moyen-âge. A défaut d'appareils de nivellement pour tracer un aqueduc en dérivation, on se laissait guider par le fil même de l'eau.

A Paris les moines de Saint-Laurent, de Saint-Martin surent ainsi créer des fontaines alimentées par les sources de Belleville ou de Pré-Saint-Gervais.

En province de pareils exemples sont plus rares. Nous citerons cependant l'aqueduc le plus ancien peut-être de la région du Nord, qui amène au château de Maignelay (Oise) les eaux d'une butte captées à plus de 2 kilomètres de distance. Il fut construit à la fin du xv^e siècle. L'idée de cette ingénieuse création avait dû prendre naissance à la faveur des guerres d'Italie.

En Allemagne, il faut citer Nuremberg qui, dès 1361, amène par des tuyaux en bois de l'eau d'un puits foré en dehors de la ville. En 1412 Augsbourg installe les pompes de la Tour Rouge.

Quoi qu'il en soit, en Allemagne comme en France, toute cette époque est pour les villes le règne des puits. Au xv^e siècle nos pays du Nord ne connaissaient donc guère les principes de la conduite des eaux. Et ce n'est qu'à la fin du xvi^e siècle qu'ils commencèrent à pénétrer chez nous.

Avec le xvii^e siècle renaissent les grandes machines élévatoires connues de l'antiquité. Le siècle suivant devait engendrer les pompes à feu qui ont pris au xix^e siècle un si prodigieux essor. Les moteurs à gaz, et surtout les moteurs électriques, vont peut-être à leur tout supplanter la machine à vapeur.

Citons les fontaines de Dijon œuvre de Darcey. Mais c'est seulement en 1847 que Belgrand, par la conduite d'eau d'Avallon, prélude à la création des grands aqueducs de la Dhuis et de la Vanne.

Paris avait toujours manqué d'eau potable (Franklin. *La vie privée d'autrefois; hygiène*, tome VII, p. 150) La Seine était polluée par les détritits de toute nature qu'elle recevait et les trois quarts des Parisiens devaient se contenter de cette boisson.

L'aqueduc du Pré Saint-Gervais menait dans la capitale diverses sources qui prenaient naissance entre Pantin et Romainville. L'aqueduc de Belleville, réparé à la fin du xvi^e siècle, alimentait six ou sept fontaines. Celui d'Arcueil, construit par les Romains et destiné à conduire au palais des Thermes les sources de Rungis, avait été refait sous Louis XIII. Enfin les pompes de la Samaritaine et du pont Notre-Dame permettaient de distribuer l'eau de Seine dans les quartiers environnants. Mais tout cela était fort insuffisant. Aussi proposa-t-on d'amener à Paris les eaux de l'Orge, de l'Hierres, de Gonesse, de Claye, de l'Ourcq, de l'Eure, de l'Yvette.

Vers la fin du xviii^e siècle les frères Perrier obtinrent enfin l'autorisation de construire les pompes à feu de Chaillot et du Gros-Caillou qui, à elles deux, débitaient chaque jour environ 6.000 hectolitres d'eau de Seine.

En 1791, les aqueducs et les pompes fournissaient quotidiennement 3.643.000 litres pour une population

évaluée à 700.000 habitants. Chacun d'eux ne disposait donc que d'environ cinq litres d'eau par jour.

Dans la seconde moitié du siècle dernier, nous constatons une grande lenteur dans le progrès des distributions d'eau, les distributions publiques, même celles des grandes villes datent presque toutes d'une soixantaine d'années à peine. Mais alors le mouvement s'accélère aussi bien en France qu'à l'étranger et gagne les petites villes et les bourgs. Les municipalités comprennent qu'une eau pure et abondante est aussi nécessaire à la santé publique que l'air et la lumière.

Mais il n'en reste pas moins vrai qu'actuellement pour beaucoup de villes ⁽¹⁾, malgré des travaux importants, l'approvisionnement en eau n'est pas garanti, ni pour la qualité, ni pour la quantité. L'alimentation en eau des campagnes reste encore trop souvent précaire et médiocre, même dans les communes riches qui ont parfois consacré de grosses sommes à leurs mairies, leurs écoles et à l'éclairage public, et qui continuent à se servir d'une eau suspecte.

D'ailleurs, les difficultés à vaincre peuvent être sérieuses et les travaux entrepris ne pas donner les résultats espérés.

Il est donc à souhaiter que les communes dans leurs plans d'extension fassent des projets aussi larges que possible tout au moins en ce qui concerne leur alimentation en eau. La difficulté qu'elles peuvent avoir un jour à répondre à la consommation en

(1) J. SALMON. *Annales d'Hygiène*, mars 1930, p. 140.

eau potable pouvant devenir un obstacle à leur accroissement et à la prospérité qu'elles pouvaient espérer.

En même temps que l'homme recherchait pour son alimentation l'eau des sources et des puits, il essayait d'expliquer l'origine de ces eaux profondes dont la présence lui était si précieuse.

Les grands esprits de l'antiquité se sont appliqués à résoudre le problème.

Platon pense que l'eau de la terre vient de l'Océan et y retourne en tombant dans un grand trou, le Tartare ⁽¹⁾.

Aristote, qui se souvenait des montagnes de Thrace et de leurs cavernes, croit que l'eau évaporée du sol se condense dans des cavités refroidies des hautes régions et y forme des lacs souterrains qui alimentent les sources et les ruisseaux. La terre elle-même pourrait se changer en eau. Thalès de Milet est plus voisin de la vérité en chargeant les vents de l'eau de la mer qui tombe sur le sol, y pénètre en partie et retourne à l'Océan. Lucrèce adopte cette dernière solution et dit que dans ce cycle l'eau de mer subit dans le sol une sorte de filtration qui en sépare le sel.

Sénèque revient à la conception d'Aristote. Mais Vitruve rapporte le premier la formation de sources à la pluie et à la neige fondue dont les eaux pénètrent dans le sol jusqu'à ce qu'elles soient arrêtées par une

(1) IMBEAUX : Essai d'hydrogéologie, 1930.

couche de pierre, de minéral, d'argile, qui les force à trouver une issue; c'est la théorie moderne.

En 1619, Képler compare la terre à un animal énorme qui aspirerait l'eau de la mer, la condenserait dans son corps et en expulserait l'eau des sources et l'eau souterraine; cependant dès 1549, Agricola voyant ce qui se passait dans les mines, avait distingué l'eau qui provenait de l'infiltration de la pluie dans les fissures du sol, de celle qui venait de bas en haut par la condensation des vapeurs ascendantes. Descartes lui, émit sa fameuse hypothèse des canaux souterrains mettant la mer en communication avec des cavernes de l'intérieur de la terre, d'où la chaleur terrestre faisait évaporer l'eau, laquelle se condensait dans les espaces plus élevés et engendrait les sources.

Le jésuite Kircher, avec ses pyrophyllacées et ses hydrophyllacées, et Kühn, de Dantzig, soutiennent des idées du même ordre.

C'est Bernard Palissy qui eut enfin la conception nette et définitive de la provenance des eaux souterraines résultant, comme l'avait dit Vitruve, de la pénétration des eaux pluviales dans le sol et de leur arrêt par une couche imperméable.

Vossius soutient énergiquement l'idée et Mariotte en établit scientifiquement la justesse en citant de nombreuses observations et en comparant au produit de la pluie sur un bassin, les volumes d'eau qui s'en écoulent par la rivière et par les sources.

Combattue par les uns (Perrault, de la Hire, Keferstein, etc...), soutenue par les autres (de la Méthe-

rie), la théorie de Mariotte finit par triompher et c'est sur elle que s'appuient les fondateurs de l'hydrogéologie moderne, les Paramelle, les Belgrand, les Daubrée, pour expliquer l'infiltration de l'eau dans les couches géologiques. La connaissance de plus en plus parfaite de la structure de ces couches et les progrès de la tectonique nous amènent à l'état actuel de la science dont le bilan ne fait que s'accroître tous les jours.

Cependant il faut signaler dans les dernières décades du ^{xix}^e siècle deux théories nouvelles, c'est d'une part la théorie de la condensation de Volger, d'après laquelle toute l'eau souterraine proviendrait de la condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air du sol; cela ne peut être vrai que pour une faible partie. D'autre part, c'est l'idée de Suesse que certaines sources chaudes viennent des eaux en quelque sorte fossiles, enfouies profondément avec les couches anciennes et remontant au jour par des cassures, il les appelle eaux juvéniles. Dolkeskamp a soutenu cette théorie et Armand Gautier a cherché à discriminer les eaux profondes d'origine fossile de celles qui proviennent de l'infiltration des eaux de surface.

Provenance des eaux souterraines

La pluie en tombant sur le sol se partage en trois fractions : une partie s'évapore à nouveau dans l'atmosphère, soit directement, soit par l'intermédiaire des végétaux (transpiration). Une seconde portion ruisselle pour former les cours d'eau qui ramènent cette eau à la mer. Enfin la troisième est celle qui s'infiltre dans le sol, remplit plus ou moins ses vides et y chemine jusqu'à reparaître au jour. Il est difficile de suivre la pluie, après sa chute. En premier lieu la fraction d'évaporation ne peut être fixée ni par le calcul ni par l'observation.

La fraction d'infiltration, celle qui produit la source souterraine, ne peut être non plus ni calculée, ni mesurée par l'observation. La fraction de ruissellement est donc la seule que l'on puisse mesurer.

En jaugeant un cours d'eau en un point donné de son parcours on a jour pour jour le ruissellement fourni par le bassin à l'amont de ce point, et en comparant le débit écoulé de l'année au total de la pluie tombée sur le bassin, on a ce qu'on appelle le coefficient d'écoulement annuel ou coefficient de ruisselle-

ment. Ce coefficient varie beaucoup d'un fleuve à l'autre (0,25 pour la Seine).

Partout où la surface du sol n'est pas immédiatement imperméable (roc compact ou argile forçant l'eau à ruisseler ou à stagner, elle laisse pénétrer une partie de l'eau tombée sur elle ou condensée dans ses pores et cette eau chemine verticalement, d'abord au travers de la couche arable du sol, puis vers la profondeur jusqu'à ce qu'elle soit arrêtée par une couche imperméable. Il se forme ainsi une première nappe dite nappe phréatique ou nappe des puits. L'eau de cette nappe peut avoir des sorts divers, ou bien, après un certain trajet souterrain, elle reparait au jour sous forme de sources, suintements, rentrée directe dans les lacs, marais et cours d'eau, et se mêle ainsi aux eaux de ruissellement, ou bien elle rencontre quelque cassure ou fissure qui la fait descendre rapidement et rejoindre une nappe plus profonde ou enfin la nappe dont elle fait partie s'enfonce elle-même progressivement et devient une nappe profonde. Dans ces deux derniers cas, l'eau suit le sort de celle des nappes profondes, laquelle peut aussi revenir au jour par sources, cassures ascendantes, puits artésiens, ou bien gagner souterrainement le lit de cours d'eau ou les fosses lacustres et océaniques.

L'eau peut passer d'une nappe supérieure dans une nappe plus profonde par des cassures descendantes.

Jusqu'où l'eau peut-elle descendre dans l'intérieur du sol ? Cela dépend essentiellement de la constitu-

tion des terrains. On voit des roches poreuses comme des grès descendre à plus de 2.000 mètres et contenir une belle quantité d'eau, mais on voit aussi dans les roches cristallines, comme les granits et les gneiss, les fissures diminuer d'ampleur en descendant et pratiquement être tellement étroites qu'elles ne contiennent plus d'eau au-dessous de 90 ou 100 mètres.

Chaque bassin hydrogéologique grand ou petit comprend une ou plusieurs couches perméables, lesquelles contiennent elles-mêmes de l'eau dans leurs pores, fissures ou interstices ; c'est à ces collections aqueuses que l'on donne vulgairement le nom de nappes, mot qui ne doit impliquer l'idée ni d'horizontalité de la surface, ni de stagnation, ni de continuité.

Nous avons vu comment se forme la nappe la plus voisine de la surface, la nappe phréatique et aussi comment s'alimentent les nappes plus profondes. L'eau d'une nappe étant généralement retenue sur le toit d'une couche imperméable et ayant son gîte dans la couche perméable supérieure, c'est le contact de ces deux couches qui crée et qui situe la nappe. C'est donc lui qu'il faut repérer dans l'échelle des terrains qui constituent l'écorce du globe.

Les petits végétaux favorisent l'absorption du calorique dans le sol et assèchent sa surface.

Les grands végétaux, les forêts paraissent jouer une sorte de régulateur sur l'humidité du sol et abaissent la température moyenne de celui-ci. Sur

les fortes pentes ils jouent un rôle protecteur en retardant le ruissellement.

L'évaporation peut atteindre 75 % des précipitations ⁽¹⁾. Le ruissellement, sensiblement nul pour un sol très perméable, devient maximum sur un territoire argileux. La pente du terrain a d'ailleurs une grande importance même pour un terrain perméable. Il en est de même de l'état d'hygroscopicité du sol.

La portion d'eau de pluie susceptible de s'infiltrer dans les terrains perméables ne dépasse guère le 1/5^e des chutes annuelles et les pluies estivales ne paraissent pas profiter aux réserves souterraines.

C'est le mode d'union des éléments du sol qui commande son degré de porosité.

La capacité du sol à contenir de l'eau variant du sol sableux où elle est de 45 % à l'humus où elle atteint 70 %. C'est la perméabilité du sol qui règle l'alimentation des nappes d'eau souterraines. La capacité ou pouvoir d'inhibition n'allant pas de pair avec la conductibilité ou perméabilité.

C'est ainsi que l'argile, qui a une capacité élevée, a une conductibilité pratiquement nulle.

Les roches compactes et continues (granit, calcaires durs) sont imperméables; mais, si l'homogénéité est altérée l'eau peut les pénétrer. C'est une perméabilité indirecte ou de fissuration.

Dans les sols tels que les sables, le surplus de l'eau qui a satisfait la capacité des pores de cette couche perméable, accuse sa descente par conductibilité et

(1) GUILLERD : Notions d'hydrologie appliquée à l'hygiène, p. 48.

vient se collecter sur la première couche imperméable. A ce moment elle comble tous les pores de la roche donnant l'idée d'un lac souterrain dans lequel on aurait a refus noyé du sable.

L'alternance dans les terrains sédimentaires des couches perméables et imperméables entraîne la formation des nappes profondes. Celles-ci tirent leur origine des infiltrations lointaines qui s'opèrent sur les affleurements de la strate imperméable. Un accident géologique tel qu'une faille pourra en permettre la montée à la surface. De même un ouvrage artificiel perçant la couche imperméable libérera ces eaux profondes qui viendront jaillir au niveau du sol si elles disposent d'une charge suffisante. Si elles n'atteignent pas jusqu'à la superficie l'eau s'élèvera à un niveau dit piézométrique toujours notablement au-dessus du toit de la nappe.

La surface piézométrique de la nappe mesurée dans un ensemble de forages traduira les variations de son niveau et de sa pression. On verra qu'elle est susceptible de s'élever avec les apports des pluies saisonnières, d'être étale lorsque l'infiltration équilibre le débit des sources et de s'abaisser enfin quand en dehors de toute pluie la réserve souterraine s'épuise.

Une mention spéciale doit être faite des nappes d'alluvions. Ces nappes que l'on trouve au fond des vallées sont peu profondes et s'alimentent à la fois par les pluies qui tombent directement sur la vallée, par les apports superficiels et souterrains des versants et enfin pour une proportion pouvant être prépondé-

rante par les infiltrations du fleuve qui leur parviennent au travers du lit plus ou moins colmaté. Ces divers apports s'équilibrent dans les matériaux meubles des alluvions.

La température augmente avec la profondeur, on avait cru pouvoir fixer à 30 mètres la profondeur correspondant à une élévation de 1 degré centigrade. Ce degré géothermique est loin d'être constant, il varie suivant la nature des roches, suivant le rapprochement plus ou moins grand d'un foyer volcanique ancien ou récent. On n'oubliera pas que sous l'influence des hautes pressions et des températures élevées les conditions de solubilité des roches se trouvent modifiées, de là la teneur élevée en certains corps des eaux profondes.

Nous avons vu que les nappes donnaient lieu à des émissions naturelles, ce sont les sources.

Ces émissions sont sous la dépendance : 1° des cassures, failles et fissures qui servent de véritables conduites pour diriger le mouvement des eaux ; 2° des rapports entre le niveau et la topographie de la couche imperméable formant le fond de la nappe et le niveau et la topographie de la surface du sol aux points correspondants.

On arrive ainsi à classer les sources en trois catégories :

a) Les sources filoniennes ou diacласiennes qui se font grâce à des cassures par lesquelles l'eau remonte des profondeurs à la manière d'un filon. Ces sources sont le plus souvent jaillissantes et constituent l'im-

mense majorité des sources thermo-minérales qui ne seront pas étudiées ici.

b) Les sources de déversement. Elles se produisent de deux manières : soit (ce qui est le cas le plus fréquent) dans les terrains primitifs au débouché sur les versants des cassures horizontales ou descendantes de la roche, soit aux affleurements à flanc de coteau des couches imperméables et par suite des nappes qu'elles retiennent au-dessus d'elles (sources d'affleurement). C'est le plus souvent la formation des vallées (vallées d'érosion ou vallées de fracture) qui a mis au jour les fissures drainantes et les affleurements des couches aquifères; aussi les sources de déversement naissent-elles d'ordinaire sur les flancs des vallées et vallons à des hauteurs qui dépendent précisément de celles des affleurements eux-mêmes.

Toutefois, si le toit de la couche imperméable a une certaine inclinaison (qui ne soit pas parallèle à celle de la vallée), il est clair que les deux versants se trouvent dans des conditions très inégales, l'un le grand versant étant plus favorisé que le petit versant.

c) Les sources d'émergence ou sources de thalweg. Elles se produisent toutes les fois que la surface hydrostatique d'une nappe s'élève librement au-dessus de la surface du sol : l'eau émerge alors au contact des deux surfaces quelle que soit d'ailleurs la situation du support imperméable de la nappe. C'est le cas des nappes d'alluvions qui accompagnent généralement les cours d'eau et le cas des nappes dont le sup-

port imperméable se tient en contre-bas de la surface du sol.

Les sources de ce genre restent dans le fond des vallées et comme elles traduisent le niveau supérieur de la nappe, elles s'assèchent successivement, en commençant par les plus élevées, lorsque ce niveau vient à s'abaisser.

Quant à la localisation des sources, il est bien évident tout d'abord qu'elle se fait sans aucune loi et tout à fait irrégulièrement pour les sources de la première catégorie, lesquelles se distribuent au hasard de l'emplacement des cassures adductrices. Il n'en est pas de même pour les autres : elles se placent le plus souvent suivant des lignes ou lieux de sources qu'il est facile de reconnaître.

Les points d'émission sont déterminés d'une part par l'allure de la surface dont les dépressions (vallées et vallons) attirent les eaux et d'autre part par la configuration de la couche imperméable dont les dépressions (gouttières synclinales, cuvettes) collectent à leur tour les eaux souterraines et préparent leur issue en masse.

L'importance du volume débité dépend précisément de cette collecte préalable et de l'étendue de la portion de nappe dont les filets sont ainsi attirés à la source, cette étendue est appelée le bassin alimentaire de la source et ce bassin a des limites souterraines analogues (mais sans coïncidence forcée) aux lignes de partage des bassins des cours d'eau superficiels. Les points les plus reculés du fond des vallons étant

d'ordinaire les points où l'issue doit se faire le plus facilement et où les filets convergent le mieux.

Pour apprécier le rendement d'une nappe souterraine ⁽¹⁾ on épuisera partiellement un puits par la manœuvre rapide d'une pompe. On mesure à la fois la dépression de niveau qui s'est produite et la quantité d'eau extraite; cette dernière est naturellement supérieure au volume d'eau représenté par la dépression; la différence entre les deux exprime sensiblement le rendement du puits pendant le temps qu'a duré l'opération. Le rendement d'une nappe souterraine dépend de la puissance, de la perméabilité et de la pente de la couche aquifère. On évalue les deux premières à l'aide de forages aidés s'il est besoin du jeu de la pompe. La pente se détermine par le niveau de l'eau dans les puits existants ou au moyen de tubes introduits à cet effet jusqu'à l'eau souterraine.

(1) *Dictionnaire encycl. des Sciences médicales* (A. DECHAMBRE.)

Facteur de pureté des eaux souterraines

A leur limpidité et à leur fraîcheur qui font que les eaux souterraines ont été de tout temps recherchées, vient s'ajouter, dès que le mécanisme de leur origine est entrevu, la notion que dans leur pénétration vers la profondeur, elles subissent une filtration qui assure leur pureté.

L'eau qui s'infiltre dans le sol se charge soit à sa surface, soit dans ses premières couches, d'un grand nombre de germes ou d'impuretés de toutes sortes. Heureusement les couches plus profondes deviennent rapidement aseptiques et jouent vis-à-vis de l'eau le rôle d'un filtre. Ce filtre est d'autant plus efficace que les pores sont plus fins et c'est ainsi qu'à une certaine profondeur, 4 à 6 mètres pour les sables, l'eau a pu récupérer sa pureté primitive.

Ajoutons que durant son contact avec les couches du sol elle se minéralise, ce qui lui donne des qualités de palatibilité.

Cette filtration naturelle est due au pouvoir absorbant et sélectif, et au pouvoir fixateur du sol. C'est l'attraction des grains solides à l'égard des éléments

dissous ou en suspension qui les fera adhérer solidement à la surface de ces grains.

La pénétration des germes sera toujours plus lente que celle des matières dissoutes. L'expérience d'Hoffmann faite à Leipzig permet d'avoir une idée de cette vitesse de pénétration. En versant sur un terrain une quantité d'eau salée égale au volume d'eau de pluie tombée en un an il a pu se convaincre qu'il fallait un an et demi à deux ans pour que cette eau pénétrât jusqu'à trois mètres de profondeur.

On voit par là les difficultés que rencontrent les microorganismes pour s'enfoncer profondément dans la terre. La terre devient stérile entre trois à cinq mètres de profondeur. C'est d'ailleurs la perméabilité du sol qui conditionne l'arrêt à une profondeur plus ou moins grande des souillures de la surface. Les sables fins et homogènes retiennent les microbes pathogènes sous une épaisseur qui ne dépasse pas quelquefois deux mètres.

Il se produit d'autre part, dans les filets liquides qui cheminent vers la profondeur, une concurrence vitale des germes nouvellement infiltrés avec les espèces adaptées aux conditions d'existence souterraine.

Le pouvoir nitrifiant du sol intervient pour une part considérable dans l'épuration de l'eau. Les transformations des matières organiques se font grâce aux microbes aérobies et anaérobies. La molécule albuminoïde passe à l'état de sels ammoniacaux puis à l'état d'acide nitrique sous l'influence des ferments nitreux et nitriques. L'acide nitrique donne avec les

bases alcalines et alcalino-terreuses du sol des nitrates solubles directement assimilables par les plantes. C'est pourquoi le sol cultivé est le grand épurateur des déchets organiques des agglomérations humaines.

Les germes pathogènes perdent peu à peu leur virulence, leur activité d'abord, leur vitalité ensuite après un séjour suffisamment long dans un milieu pauvre en matières organiques.

L'eau de pluie (F. Diénert. Filtration horizontale d'une eau. *Annales d'Hygiène*, février 1931) absorbée par le sol, s'infiltre verticalement pour gagner la partie imperméable, puis s'écoule horizontalement ou presque pour gagner l'exutoire naturel des eaux souterraines qui est la source.

La descente verticale est la plus courte ; au contraire le parcours horizontal est le plus long. Si donc, pendant le parcours vertical, l'eau s'épure en partie, c'est pendant sa translation horizontale qu'elle achèvera son épuration et atteindra la pureté remarquable de certaines eaux souterraines qui arrivent au jour à l'état stérile.

Dans les alluvions des rivières, alimentées par l'eau de celles-ci, la purification des eaux souterraines se fait à peu près uniquement pendant leur parcours horizontal.

Dans le processus de filtration, surtout lorsqu'il s'agit de translation horizontale, les phénomènes de décantation se manifesteront et les microbes se déposeront, la décantation complétant ainsi l'effet de l'absorption. En outre des actions chimiques pourront se

produire. Le sable renferme non seulement de la silice mais encore des sels de fer, de la chaux, etc... Le fer en particulier est souvent à l'état de sels ferreux (silicate, carbonate, sulfure, etc.) qui vont réduire les nitrates. Ces phénomènes de réduction sont souvent suivis d'effets nocifs sur les microbes de l'eau.

Ainsi le sulfure de fer, en présence d'un peu de carbonate de chaux et d'eau chargée de microbes, est capable en quelques heures de stériliser complètement celle-ci. Cette action est surtout efficace quand l'eau reste privée pendant quelque temps d'oxygène et explique l'existence d'eaux naturellement stériles dans certains terrains.

Enfin, nous dirons un mot dans ce chapitre concernant les facteurs de pureté des eaux souterraines, des qualités organoleptiques qu'elles présentent, c'est-à-dire l'ensemble des propriétés physiques et chimiques provoquant certaines sensations physiologiques. Ces propriétés acquises par l'eau dans sa pénétration vers la profondeur viennent en particulier de la minéralisation qui est fonction des terrains traversés et de la solubilité des roches de ces derniers et de la température ; l'eau de boisson est agréable entre 9 et 14° et fade et nauséuse au-dessus de 20°. Ces qualités, dont la plus frappante était la limpidité, ont tout d'abord seules retenues l'attention, et fraîcheur, limpidité et goût agréable ont été avant les découvertes des microbiologistes, synonymes de pureté.

Cause de souillure des eaux souterraines

Si l'eau idéale doit être l'eau de source, c'est-à-dire une eau sortant de terre, on se préoccupe fort peu d'ordinaire de savoir si cette eau née de la pluie a subi un voyage souterrain de nature à lui enlever toutes les souillures recueillies à la surface, ni si elle n'est point une simple résurgence de ruisseaux ou de courants recueillis par des cavités souterraines et voyageant dans le sol sans y éprouver de filtrage épurateur. Tel est le cas par exemple de beaucoup de sources de pays calcaires.

Les terrains sont d'autant plus filtrants, d'autant plus épurateurs que leurs vides sont plus réduits, d'où cette conséquence capitale en géologie hygiénique que les terrains homogènes retiennent les microbes pathogènes, tandis que les crevasses des terrains fissurés les laissent circuler. Il faut se garder de confondre l'infiltration avec la filtration ou plutôt le filtrage. Il ne suffit pas qu'une eau sorte de n'importe quel sol, claire ou limpide, fraîche, sans odeur ni saveur et chimiquement pure pour constituer une eau saine sans danger pour la consommation.

Dans leur pénétration vers la profondeur les eaux agrandissent les interstices de la roche sous une double action, mécanique d'abord, en érodant les parois; chimique, ensuite, en dissolvant les éléments de la roche. Il se forme des cheminements appelés diaclases, qui s'agrandissent en provoquant l'éboulement de vastes portions rocheuses qui entraîne parfois la chute du terrain superficiel qui se relie ainsi avec les profondeurs par une voie directe d'accès où les eaux folles s'engouffrent. Ces phénomènes portent les appellations variées de bétoires, abîmes, aiguigeois. Une science nouvelle est née de l'étude de ces cavernes, la spéléologie dont E.-A. Martel fut le fondateur. Et, d'après cet auteur, la plus grande partie des abîmes serait due à cette action des eaux superficielles érodant la roche de haut en bas. L'exploration de ces abîmes a révélé l'existence de véritables rivières souterraines et ces réseaux peuvent être habités par des poissons et autres animaux aquatiques pouvant aller par des voies souterraines d'un gouffre à un autre ou bien sortir par un puit artésien rencontré dans ce parcours.

Les observations qui ont été faites ont montré dans le même ordre d'idées que les pertes de ruisseaux et de rivières étaient un phénomène très général. C'est pourquoi Martel a proposé de n'appeler sources que les émergences écoulant les eaux de nappes continues, celles formées dans les terrains perméables en petit, reconnaissables à la constance de leur limpidité, de leur température et de leur débit faible d'ailleurs ;

puis de réserver l'appellation de résurgence aux exutoires des territoires fissurés, capables d'écouler des débits parfois considérables des réseaux souterrains. On comprendra combien la contamination de ces derniers est facile si l'on songe que dans leur parcours superficiel, les eaux auront recueilli largement les produits usés des agglomérations humaines ; la moindre pluie lave le sol souillé, dilue les purins débordant des tas de fumiers, et tous ces ruissellements gagnent le thalweg ou le ruisseau qui le parcourt se perdra souvent apportant à la nappe souterraine des germes dans toute leur virulence.

Dans le cas où les terrains perméables sont des terrains fissurés régnant sur de grandes étendues, une fissure peut drainer un vaste territoire qui, dès lors, n'a pas de sources, et amener à son aboutissement au jour une énorme quantité d'eau : c'est ce genre de source qu'on qualifie de vaclusienne et dont les eaux sont presque inévitablement souillées étant donné la multiplicité des possibilités de contamination.

Dans ces réseaux souterrains peuvent se former de vastes cavités qui, en dehors de fortes précipitations atmosphériques, retiennent des réserves d'eau, dans lesquelles une certaine décantation peut s'exercer et aboutir à une auto-épuration intéressante. Mais cette possibilité a sa contrepartie en ce que une nouvelle crue rendra les microbes décantés à la circulation. Quoi qu'il en soit, on peut admettre que l'eau engouffrée dans le sol s'y épure plus ou moins com-

plètement si elle y séjourne un temps suffisamment long.

D'autre part, les phénomènes de nitrification sont très actifs dans les territoires fissurés alors que leur pouvoir filtrant est faible, à moins que les fissures ne soient remplies de plus fins éléments. Tout se résumerait donc à une question de vitesse pour la possibilité des phénomènes d'auto-épuration. Une nitrification active appauvrissant le milieu d'éléments favorables à la propagation des germes.

Les différents temps de la nitrification demandent certaines conditions de température, d'humidité et d'oxydation, ainsi que la présence d'une base saturante ($\text{CO}^3 \text{Ca}$). D'où le faible pouvoir nitrifiant des sels siliceux pauvres en chaux. Nous venons de voir apparaître dans l'appréciation du pouvoir épurant des sels et par conséquent du degré de potabilité des eaux qui en sont issues des notions nouvelles de vitesse de propagation des filets liquides, de temps de séjour dans les nappes profondes et de nature même des terrains.

D'autres causes de souillures peuvent venir des rentrées d'eaux profondes en rivière. Souvent des filets liquides poursuivent leur cheminement souterrain jusqu'au cours d'eau même et leurs points d'émergence sont immergés sous les eaux de la rivière d'où un danger pour la pureté des sources apparentes. Si des anastomoses, des diaclases, reliant la nappe souterraine, les sources immergées et la rivière existent, ce n'est plus qu'une question de charge pour que

les eaux de la rivière s'infiltrèrent et gagnent les sources émergées. En période sèche, quand le débit des eaux souterraines s'affaiblit; ou quand le niveau du cours d'eau monte, par exemple.

Enfin, il est de toute évidence que la nappe phréatique la plus voisine du sol, donnant accès à de nombreux puits, très utilisée, est également très souvent souillée.

Quand on parle de puissance filtrante du sol, s'il y a des régions où cette puissance est efficace, il en est d'autres où elle est faible ou nulle et où les cimetières, les lavoirs, les fosses d'aisances sont une menace permanente pour la circulation souterraine et les eaux de source.

Dans un terrain donné, le filtrage effectif ne dépend guère de la profondeur atteinte par l'eau pluviale dans son mouvement de descente, il dépend avant tout de la nature des assises traversées; quelques mètres de grès ou de sables fins suffisent à une épuration complète alors qu'un calcaire crevassé peut livrer passage à des ruisseaux sans leur enlever la souillure. Il existe donc dans chaque région un niveau de l'asepsie terrestre et les nappes inférieures à ce niveau méritent seules la confiance.

Néanmoins, on peut voir des défaillances de la filtration en cas de contaminations massives et rapprochées, même dans les terrains à pouvoir épurant élevé.

L'eau d'une nappe est impure quand les terrains qui la surmontent ne réussissent pas à bien filtrer

l'eau pluviale. Quant à l'eau d'une source elle peut être impure de deux manières. Soit parce que la nappe qui l'engendre l'est elle-même, soit parce que tout en émergeant d'une nappe pure, la source subit des contaminations à sa sortie, à la traversée des éboulis ou dans des ouvrages de captage mal établis.

La déviation des sources se fait souvent vers l'aval par suite de la présence des éboulis et des alluvions déposés après coup sur les affleurements des terrains en place et les masquant en partie.

Les sources descendent sous les éboulements depuis l'affleurement du support de la nappe, point qui forme ce que l'on appelle la source géologique jusqu'à l'endroit où se trouve l'issue définitive de l'eau à la surface, la source réelle. On voit également comment il arrive parfois que l'eau de la nappe élevée gagne sans se montrer les alluvions du fond de la vallée et va y renforcer la nappe souterraine sans avoir engendré de sources visibles : il peut arriver également que des sources nées à flanc de coteau laissent, après un certain écoulement superficiel, rentrer leurs eaux sous les éboulis et alluvions et renforcent encore de la sorte la nappe de la vallée. Enfin on voit encore des cas où une source ordinaire se transforme en une source jaillissante, mais située plus bas : c'est quand l'eau, ayant pénétré sous une couche superficielle imperméabilisée, rencontre un orifice accidentel de cette couche qui lui permet de la traverser en cherchant à reprendre son niveau.

Cette considération du trajet des sources sous les

éboulis et les alluvions est très importante au point de vue hygiénique. Dans ce trajet l'eau est en effet à faible profondeur et elle se trouve par suite très exposée à recevoir des particules terreuses capables de la troubler et des infiltrations d'eaux superficielles contaminées : le fait est d'autant plus à craindre que c'est généralement sur les alluvions et les éboulis qui tapissent le fond des vallées et la base des coteaux que l'homme élève ses habitations et dépose par suite les produits de la vie animale et industrielle.

Méthodes permettant de dépister les diverses causes de souillure des eaux souterraines

Nous étudierons maintenant les méthodes permettant de dépister les diverses causes de souillure des eaux souterraines; ainsi que nous l'avons vu par ce qui précède, les analyses chimiques et bactériologiques ne peuvent prendre de valeur que si elles s'appuient sur des expériences faites sur le terrain, il en résulte que ces études comprendront une partie hydrologique importante. Les premières investigations devront avoir pour but de délimiter le périmètre d'alimentation des émergences étudiées, territoire sur lequel toute molécule d'eau infiltrée contribue à l'alimentation de la nappe débitrice. On pourra ainsi effectuer trois groupes d'expériences :

- 1) Celles qui établissent la matérialité de la relation d'une source avec son périmètre d'alimentation.
- 2) Celles qui donnent une idée de l'épuration acquise par les eaux dans leur trajet souterrain.
- 3) Celles enfin qui déterminent la proportionnalité de l'eau d'une perte ressortant à la source.

Le périmètre d'alimentation une fois bien établi et connu dans toutes ses particularités, on pourra se rendre compte de la façon dont chaque émergence se contamine.

En effet, les analyses faites au laboratoire traduisent un état relatif au moment même où elles ont été pratiquées, elles disent si la source est contaminée ou non; mais elles ne renseignent pas sur le fait de savoir si elle est contaminable dans un autre avenir à la suite de modifications dans son mode d'alimentation.

En un mot apparaît, s'ajoutant aux analyses, la notion du régime des eaux. On peut prévoir tout de suite que dans les terrains perméables en petit, le périmètre alimentaire sera relativement restreint et circonscrit autour de l'émergence, tandis qu'au contraire les territoires fissurés offriront des types de circulation très variables, et c'est pourquoi l'étude d'un périmètre d'alimentation, qui comprend la détermination de ses limites, celles de la vitesse souterraine des filets liquides, l'appréciation de la puissance de la réserve aquifère et de l'épuration acquise pendant le séjour souterrain, comporte des méthodes qui varieront avec la nature des terrains examinés.

Comparaison des débits.

La comparaison des débits représente une méthode sensible dont l'interprétation des résultats est d'ailleurs délicate.

On pourra, connaissant la surface du bassin et la totalité de la pluie annuelle calculée d'une façon d'ailleurs très approximative, le débit total des émergences de ces territoires.

Ces calculs sont susceptibles d'indiquer que toute l'eau infiltrée ne ressort pas aux émergences apparentes et qu'une partie de la nappe, grâce aux défail-
lances de la couche imperméable, va enrichir des formations plus profondes.

Dans les terrains perméables en petit le débit sera faible mais variera peu. Dans les territoires fissurés on observera des variations rapides en dehors des grandes amplitudes saisonnières.

Si l'on soupçonne un ruisseau de rentrer sous terre et de fournir de l'eau à une source on étudiera parallèlement les débits du cours d'eau et de la source et la concordance des variations (avec un certain décalage dû au temps de transmission) serait une preuve de communication.

Enfin, on peut parfois amener artificiellement de l'eau et la faire pénétrer dans le sol en un point en cherchant l'effet sur une émission présumée.

Ces mesures du débit d'un puits ou d'une source sont grandement facilitées par le moyen de jaugeages chimiques.

Pour la mesure du débit d'un puits on y introduit du chlorure de sodium que l'on mélange à la masse de l'eau du puits. On a une concentration déterminée. Après un certain temps la concentration a diminué

d'une certaine proportion, on peut en déduire le débit du puits.

Pour une source ou petit cours d'eau on s'arrange à obtenir un mélange homogène du chlorure de sodium, on surveille le passage du mélange salin avec des électrodés reliées à un ampèremètre; quand celui-ci donne une intensité constante, on prélève et on dose.

Etude des températures.

L'étude des températures constitue une méthode simple peu coûteuse et féconde en résultats.

Les variations de la température atmosphérique se répercutent dans le sol suivant la nature de celui-ci jusqu'à une profondeur de 15 à 20 mètres au-dessous, la température du sol n'est plus influencée par les variations des saisons. La température de l'eau souterraine suit donc la température moyenne du lieu. Dans les régions montagneuses celle-ci varie suivant l'altitude et décroît d'environ 1° par 150 à 200 mètres de dénivellation.

La température de l'eau sera d'autant plus voisine de celle de la roche imprégnée que les fissures par lesquelles les eaux sont véhiculées seront plus fines. Pour les sables la température sera très régulière et la pureté bactériologique très grande pour les mêmes motifs. Une température régulière reflète donc une épuration convenable. Tandis que pour les territoires fortement fissurés comportant des gouffres et des bétoures où les sources ne sont que des résur-

gences, il n'y a pas d'échanges de température suffisants entre la roche et les eaux de surface dont l'arrivée perturbera la constance de la température de la nappe souterraine. Les variations de température des résurgences accompagnent les apports d'eaux souillées. En ce qui concerne les formations gréseuses, les variations de température fixeront son degré de fissuration.

Il faudra construire un graphique et prendre à la même heure chaque jour la température ambiante et tenir compte des chutes d'eau météorique. On peut observer les deux cas suivants : 1^{er} cas, la courbe est horizontale, il faut en conclure que l'émergence ne reçoit pas ou peu d'eaux superficielles engouffrées, en tout cas le parcours souterrain des eaux est long ou leur séjour est prolongé, la réserve profonde où la source s'alimente est importante, les diaclases qui assurent l'écoulement sont fines.

Tous facteurs garantissant une grande constance de minéralisation et une épuration intéressante.

2^e cas : On observe des variations de plusieurs degrés d'une saison sèche à une saison humide. L'arrivée d'eau engouffrée n'est pas douteuse, la contamination certaine.

L'exposition d'un périmètre, son altitude, son mode d'exploitation cultural ou boisé, ce dernier refroidissant le sol sont autant de facteurs influant sur la température des eaux profondes. D'après la température de deux sources on peut conclure à leur alimentation par des territoires distincts si elles ont

des températures moyennes différentes. Tel est le cas des sources du Loing. La source de Nemours, provenant de la rive gauche dénudée, présentant une température supérieure de 1° à celle de la source de Bourron provenant de régions boisées. La comparaison des deux courbes de la température ambiante et de celle de la source étudiée peut montrer un certain décalage entre les variations de l'une et de l'autre. Si celui-ci est important, il atteste un territoire de fine perméabilité.

La température peut varier dans des limites très diverses suivant les cas envisagés; et il y a toujours lieu d'examiner de très près les circonstances de faits et de lieux dans lesquelles ces variations se produisent; le mode d'émergence d'une source captée pouvant influencer grandement sur sa température.

Les eaux des alluvions, qui comblent les thalwegs où ils constituent des dépôts perméables dans lesquels des nappes parfois très puissantes se constituent, ont une thermique complexe.

Leur faible puissance (10 m. en général) permet l'influence de la température extérieure. Les eaux du fleuve peuvent faire refluer plus ou moins loin les eaux arrivant du coteau.

La mesure des températures dans un puits d'essai permet de relever des différences allant jusqu'à 2° entre des filets liquides distants de 10 cm. seulement. Il y a donc des cheminements différents sous des vitesses variables.

D'autre part, on peut mettre en évidence l'exis-

tence d'eaux souterraines sous-fluviales, plus fraîches parce qu'infiltrées précédemment au moment d'une crue à une période où la température extérieure était plus froide.

Enfin l'étude méthodique des températures du fond du fleuve permettra de dépister des rentrées d'eaux profondes en rivière, et dont la connaissance permet de prévoir la possibilité de contamination en période sèche.

Les températures seront prises au moyen de thermomètres électriques basés sur les variations de la résistance électrique d'un conducteur en fonction de sa température.

Hydrotimétrie.

Des indications intéressantes pourront nous être données également par l'étude du degré hydrotimétrique des eaux.

La minéralisation d'une eau est fonction de la nature des terrains traversés, de la durée de contact entre l'eau et la roche et de la solubilité de cette dernière. La composition chimique d'une eau est donc solidaire de celle des roches de son périmètre d'alimentation. Les nappes se caractérisent par le degré hydrotimétrique des eaux qu'elles écoulent. Il est intéressant de réunir entre eux les points d'eau où la dureté est la même; on a ainsi des courbes que l'on peut appeler isogradhydrotimétriques et leur allure fournit des indications sur les zones de circulation lente ou rapide des eaux souterraines.

L'analyse chimique, en décelant la présence de tel corps caractéristique en solution (magnésie), permettra de rapporter l'origine des eaux à tel terrain.

D'autre part, l'analyse chimique est très importante. On dose les matières organiques totales, les nitrites, les nitrates et d'autres produits (acides, gaz, métaux) s'il est nécessaire. Les trois premiers sont importants. Les matières organiques dosées par réduction du permanganate de potasse en solution titrée indiquent une souillure, mais cette réaction seule ne suffit pas. L'eau peut avoir passé sur des matières végétales qui y ont macéré, sans avoir fermenté. Ordinairement on admet qu'il ne faut pas qu'une eau potable contienne plus de 3 mmgr. de matières organiques par litre évalués en oxygène emprunté au permanganate. Les nitrites et les nitrates doivent être absents, surtout les premiers. Une dose de 1 mmgr. de nitrates indique une souillure organique d'origine animale. L'eau doit être tenue pour mauvaise à partir de 2 mmgr.

Les sources riches en nitrates auront un périmètre d'alimentation de préférence sur les territoires dénudés et assolés.

Mesure de la radio-activité.

Des indications utiles pourront être données par la mesure de la radio-activité des eaux. Chaque terrain géologique aurait sa radio-activité propre. Les

eaux qui sont dans un terrain se mettent très rapidement en équilibre radio-actif avec lui. De telle sorte que lorsque les terrains constituant le périmètre d'alimentation présente une sédimentation simple et non bouleversée, l'étude de la radio-activité des eaux peut donner des renseignements assez précis sur le gisement géologique. La radio-activité, comme le degré de minéralisation, varie parce que les formations géologiques ne sont pas homogènes sur toute leur étendue. Elle peut donc permettre parfois de faire la distinction entre des eaux de différentes origines.

Mesure de la turbidité.

La limpidité des eaux sera de nature à donner des indications précieuses. Dans les territoires finement perméables les eaux sont limpides. Dans les régions fissurées la transparence est altérée aux cas d'apports brusques ou d'effondrement souterrain (auquel cas le danger est nul au point de vue bactériologique). Les eaux peuvent être colorées et troublées si elles sont issues de l'altération ou de tourbières (substances organiques colloïdales). Des eaux limpides à la sortie peuvent se troubler ensuite à la faveur de précipitations chimiques comme dans les eaux ferrugineuses ou sulfureuses, ou riches en sels calcaires. La turbidité se mesure par la méthode au fil de platine, l'étalon étant obtenu au moyen d'une suspension de silice. On compare l'eau à l'étalon, on dilue l'un ou l'autre pour avoir égalité de teinte.

Mesure de la résistivité électrique des eaux.

Une recherche d'un intérêt pratique considérable est celle de la résistivité électrique des eaux. Recherche qui s'effectuera d'une façon pratique et rapide en utilisant un dispositif analogue au pont de Wheatstone, la lecture se faisant au téléphone grâce à la mise en jeu d'un courant alternatif. La résistivité électrique d'une eau est le reflet de sa minéralisation. Une eau sera d'autant plus conductrice qu'elle aura dissous dans son trajet souterrain plus de matières minérales empruntées aux roches. La solubilité de ces matériaux, la vitesse des eaux profondes, la tension variable du gaz carbonique influenceront sur la résistivité électrique. On obtient des chiffres de d'ordre de 40.000 ohms pour les grès vosgiens, 12.000 ohms pour les grès permien. 1.000 pour la nappe conchylienne, 5 à 6.000 pour l'infracorallien. 1.700 pour le sparnacien, 4.000 pour les sables verts. La résistivité électrique peut donc servir à caractériser rapidement les différentes eaux qui émergent sur un territoire. En effet, en quatre à cinq jours, la minéralisation d'une eau arrivant dans le sol, atteint la limite maximum de minéralisation qu'un séjour plus prolongé dans le sol ne peut lui faire dépasser. La méthode de la résistivité électrique permet donc de mesurer la minéralisation d'une eau, laquelle demeure invariable si l'eau est restée quelques jours dans le sol. Le périmètre d'alimentation peut être divisé en zones à minéralisation bien déterminée. Si

les émergences ne reçoivent que des eaux à minéralisation unique, la résistivité électrique des eaux sera constante, à condition qu'il n'y ait pas d'apport d'eau de pluie récemment infiltrée. Des changements brusques de la résistivité électrique, une brusque montée par exemple indiquera une arrivée d'eau de pluie qui aura gagné facilement les sources. Il s'agit donc dans ce cas d'une variation brutale qui, sur un graphique, s'inscrira sous forme d'un clocher. Clochers qui pourront se reproduire à intervalles variables en rapport avec les précipitations atmosphériques. Tout différent est le cas d'une source recevant de l'eau de plusieurs zones ayant chacune une minéralisation particulière. La résistivité électrique pourra, en l'absence de tout apport d'eau récemment infiltrée, subir des variations, mais alors celles-ci se montrent continues et régulières et lentes à se produire.

On observe d'ailleurs que partout où au moment des pluies les eaux de sources se troublent et louchissent, la résistivité électrique des eaux monte rapidement. La résistivité électrique d'une eau est donc bien une expression constante de sa minéralisation dans les conditions de son régime.

Pour la détermination d'un périmètre, il faudra tout d'abord connaître la résistivité électrique des points d'eaux situés sur les territoires d'amont, puis rapprocher les parties de ces régions où la moyenne des résultats obtenus est en rapport avec la valeur de cette même mesure prise à la source expérimentée.

Il ne faut pas retenir les chiffres donnés par des

eaux qui s'avèrent contaminées, leur composition anormale n'étant nullement en rapport avec le terrain où elles se trouvent.

On voit donc par ce qui précède que l'étude de la résistivité électrique est un procédé rapide, très sensible, permettant de suivre facilement une eau et de déceler immédiatement un apport anormal de substances minérales.

Addition de corps dissous.

Une méthode d'information pourra également être fondée sur l'addition de corps dissous reconnaissables chimiquement ou électriquement.

La reconnaissance et le dosage des chlorures étant faciles, on s'adressera au chlorure de sodium ou au chlorure de calcium.

Si l'on introduit une solution de chlorure de sodium dans certains gouffres et que l'on dose la quantité qui reparait aux sources, on aura déterminé ainsi le pourcentage d'eau engouffrée et l'on pourra se faire une idée du danger possible d'après le taux de dilution subi par les projections microbiennes éventuelles.

L'observation du déplacement d'une solution de chlorure de sodium projetée dans une série de puits en amont dont on surveille le passage dans une ligne de puits identiques pourra donner une idée de la vitesse et de la direction des eaux.

Le passage de l'électrolyte sera révélé au moyen

d'un galvanomètre reliant deux électrodes placées l'une dans le puits en aval, l'autre dans le puits en amont.

Pour établir la relation entre les points absorbants et les sources des thalwegs, on peut également colorer fortement les eaux qui s'engouffrent, puis essayer de déceler le passage ou la réapparition définitive de cette coloration dans les émergences étudiées. La fluorescéine est la substance la plus indiquée en raison de sa grande puissance de coloration, c'est le phtaléine de la résorcine dont on utilise les sels alcalins solubles dont la solution concentrée est rouge et la solution diluée montre une belle fluorescence verte.

On peut utiliser aussi l'esculine provenant de l'écorce du marronnier, la fuschine qui ne révèle qu'à une concentration plus grande que la fluorescéine, les colorants sulfonés tels que le violet acide, le vert acide.

Expériences à la florescéine.

La fluorescéine est de beaucoup la plus employée. Lorsqu'on la projettera dans un courant superficiel à débit suffisant la fluorescéine sera dissoute dans le minimum d'eau. S'il s'agit d'un rû temporaire il faudra s'assurer d'une absorption d'eau suffisante après le jet de la matière colorante. Lorsque le tarissement du cours d'eau semble être dû à un lit poreux il faut faire le jet à l'amont de la perte.

Dans le cas de puits ou de puisards il faudra dis-

poser d'une quantité d'eau suffisante pour entraîner la matière colorante du point où se fait le jet à la diacalse parcourue par le courant souterrain. Dans le cas d'un puisard il faudra faire absorber de l'eau pendant plusieurs heures avant le jet de la coloration. S'il s'agit de fosse d'aisance, de fosse à fumier, il faut s'assurer de la faculté d'absorber l'eau, pour le fumier on pratiquera un petit fossé autour dont on vérifiera le pouvoir absorbant. Dans le cas d'un forage, si l'ouvrage est jaillissant, il faut le surmonter de tubes étanches et faire des essais d'absorption. Si le niveau d'eau reste, procéder au jet de colorant, avec cette condition de descendre le colorant au niveau de l'arrivée d'eau dans le forage.

Les apports d'eau de chasse peuvent modifier l'hydrologie locale. Une expérience positive s'affirmera par la netteté des colorations et la rapidité relative avec laquelle elles sont obtenues.

Cependant dans tous ces cas : puits, puisards, forages, lits poreux, fosse, la matière colorante n'arrivant que lentement et faiblement aux diaclasses souterraines qui peuvent être de vitesse et de débit importants, il y a lieu de prolonger la durée de la coloration et d'en augmenter l'intensité.

Néanmoins, il arrive que très souvent dans ces conditions, que les résultats sont négatifs, parce que la coloration s'est trouvée trop diluée pour rester visible.

La quantité de fluorescéine à employer est très variable. La coloration doit être suivie et recherchée

sans délai sur tous les points où elle est susceptible de réapparaître, les prélèvements seront faits toutes les trois heures, la vitesse de translation peut, dans certains cas être très rapide, atteindre 10 km. par 24 heures ou au contraire se prolonger pendant une année.

La fluorescéine se reconnaît à l'œil nu à la dose de $1/10.000.000^{\circ}$.

Des concentrations plus faibles nécessitent pour être reconnues des appareils spéciaux appelés fluorescopes. Le fluorescope de Trillat est un tube de cristal de 1 cm. de long sur 2 cm. de diamètre et fermé d'un côté par un bouchon noirci à la plombagine, il contient environ 300 cc. d'eau. Une série de ces tubes est préalablement examinée avec une même eau et, à la suite de cet essai, on en élimine le plus souvent 50 % donnant des colorations propres très différentes. On ne conserve que ceux offrant une teinte uniforme. Une eau teintée de fluorescéine y apparaît avec un reflet verdâtre.

Cet appareil permet de déceler des concentrations de 10^{-9} . Le fluorescope de Schardt est formé d'un tube à essai de 2 décim. de longueur, gainé d'une enveloppe noire collée sur lui et n'offrant qu'une étroite lumière de 3 mm. sur toute la longueur d'une génératrice.

En plaçant l'œil au-dessus du tube on obtient un pinceau lumineux vert. Ces appareils sont très commodes à condition de disposer d'une bonne lumière et ne sont utilisables que le jour. En hiver leur sensi-

bilité est donc fortement diminuée. Le fluorescope électrique représente un sensible progrès sur eux. Il consiste en un arc électrique placé au foyer d'une lentille convergente. Une deuxième lentille concentre le faisceau lumineux en un point. L'eau à examiner est placée en ce point dans un petit flacon qui s'illumine d'un beau rayon vert si l'eau contient quelques traces de fluorescéine. L'examen est rapide et la sensibilité atteint le milliardième. L'examen peut être pratiqué le soir.

Grâce à ces méthodes on peut aller plus loin que la recherche d'une simple communication entre un point d'entrée et un point de sortie de l'eau et on peut se faire une idée de sa direction et de sa vitesse souterraine. On peut se servir de la fluorescéine pour étudier la marche des eaux dans une nappe souterraine. Il suffit d'observer un grand nombre de puits et de sources s'alimentant à cette nappe dans la région du béttoire où l'on introduit la fluorescéine et de noter d'une manière précise l'apparition de la coloration aux divers points d'observation considérés. Le lieu géométrique des divers points où la matière colorante arrive dans le même laps de temps est une courbe que l'on peut appeler courbe isochronochromatique. En construisant sur une carte ces courbes pour une durée de 10, 20, 30 heures, on arrive à donner immédiatement idée de la manière dont l'eau absorbée par un béttoire se répartit dans une nappe souterraine. Les courbes éloignées les unes des autres indiquent une circulation rapide, les courbes rapprochées une circu-

lation lente. Ces courbes sont à rapprocher des courbes isogradhydrotimétriques dont nous avons parlé précédemment.

Nous ne ferons que citer l'emploi que l'on peut faire des corps odorants tels que le saprol, reconnaissable à 1/100.000^e, le pétrole et d'autres carbures liquides dont l'utilisation ne présente aucune supériorité sur celle de la fluorescéine.

Corpuscules en suspension.

Au contraire des expériences fondées sur l'addition de corpuscules en suspension, méritent de retenir l'attention étant donné qu'elles réalisent des conditions qui imitent d'assez près ce qui se passe lors des contaminations naturelles.

On pourra employer l'amidon, décelable par l'iode et au microscope en lumière polarisée, les levures telles que *micrococcus prodigiosus*, *mycoderma aceti*, mais ces levures sont assez fréquentes dans les eaux et l'on s'adressera plutôt à *saccharomyces cerevisioe* ou levure de bière, bien que dans les régions de vignes ou de pommier on puisse trouver dans les eaux de sources des levures qui ressemblent beaucoup à de la levure de bière. On emploiera celle-ci à dose massive. Les eaux à examiner sont prélevées ensuite etensemencées dans un bouillon approprié (acide tartrique, bitartrate de potasse, sucre, peptone). Les levures sont recherchées au microscope et d'une façon quantitative par le dosage de l'alcool formé. Mais la

levure est une cellule de grande taille dont les dimensions sont nettement supérieures à celles du bacille d'Eberth et là où la levure est arrêtée un germe pathogène plus petit peut passer. D'autre part la levure est robuste, un microbe pathogène plus fragile n'aurait peut-être pas survécu dans les mêmes conditions de milieu.

On a alors pensé à s'adresser à des cultures de bacilles facilement identifiables tels que le bacille pyocyanique, ou mieux encore au bactérium coli acclimaté aux antiseptiques et en particulier à l'arsenic et aux fluorures. On cultive l'eau contaminée par projection des cultures de bacille acclimaté dans les endroits suspects. Cette eau est cultivée sur des bouillons arséniatés.

Une simple réaction à l'indol fournit rapidement la vérification de la nature du germe cultivé.

On ne trouve jamais dans le sol ni dans les eaux de bactérium coli pouvant cultiver dans des bouillons aussi riches en arséniate. Ce germe a en outre l'avantage d'être de même dimension que les germes pathogènes. Le germe acclimaté répond donc bien aux conditions des expériences faites en vue de la recherche du pouvoir filtrant du sol.

Pour apprécier ce pouvoir filtrant dans les alluvions on crée une absorption dans l'alluvion à une certaine distance du puits. On contamine l'eau artificiellement pendant plusieurs heures et à un mètre du point contaminant, en direction du puits captant, on pratique un ou deux forages instantanés où l'on éta-

blira les analyses de départ de la contamination (tant de colibacille par 100 cc. d'eau). Dans une expérience précédente on aura déterminé à l'aide de la fluorescéine ou d'une solution saline la proportion d'eau absorbée qui apparaît dans le débit du puits pompé. On pourra ainsi apprécier la dilution que subit la projection microbienne et qui est sans relation avec l'épuration acquise dans le terrain. Le rapprochement des deux chiffres, celui donné par l'analyse de l'eau du puits après la contamination et celui qui correspond à la dilution microbienne, permet de se rendre compte très exactement du pouvoir filtrant.

A ces diverses méthodes pourront s'ajouter les renseignements fournis par la mise en œuvre de procédés intéressants, mais dont l'interprétation des résultats est souvent bien délicate.

Auscultation des bruits souterrains.

Dans cet ordre d'idées citons : l'auscultation des bruits souterrains permettant de déceler la présence d'un courant liquide souterrain au moyen d'un grand cornet acoustique que l'on applique sur le terrain (acoustèle de Daguin).

Etude des courants telluriques.

L'étude des courants telluriques : l'atmosphère est chargée d'électricité positive et le sol d'électricité négative, mais ses différents points ne sont pas au même

potentiel et il se produit entre eux des courants électriques, d'intensité et de direction variables.

Ces courants, généralement dirigés de l'est à l'ouest, sont influencés par différentes causes, notamment par la présence de masses métalliques, de masses aqueuses telles que les nappes et rivières souterraines, ils réagissent sur l'aiguille aimantée. Mais ces courants sont faibles et difficiles à déceler.

Résistivité électrique du sol.

Les variations de la résistivité électrique du sol sont également à étudier. La résistivité de chaque terrain varie non seulement avec la quantité d'eau qui l'imbibe, mais encore avec la température, la minéralisation de l'eau, la pression, en sorte que les conclusions sont difficiles à formuler.

Emploi des ondes hertziennes.

Par l'utilisation des ondes hertziennes, les ondes se réfléchissant sur la nappe d'eau souterraine, on pourra déterminer ainsi l'existence et la profondeur de celle-ci. Cette méthode exige que le terrain qui surmonte la nappe soit très sec.

Mesures à prendre pour empêcher la contamination des eaux

Ces mesures seront l'œuvre d'un service local de surveillance (M. Diénert, Trente ans d'activité du Service de surveillance des eaux d'alimentation de Paris. *Annales d'Hygiène*, juillet 1929), qui aura pour but d'étudier sur le terrain la circulation souterraine des eaux, de délimiter le périmètre d'alimentation des sources, de rechercher toutes les causes de contaminations existant sur ce périmètre, de dépister tous les malades d'origine hydrique qui occupaient cette région, de tuer les germes dangereux à la sortie du corps de ces malades, d'empêcher la propagation d'une épidémie sur ce périmètre, de supprimer la plupart des causes de contaminations, et en résumé de réduire au strict minimum la nocivité des eaux captées. Il était plus logique d'arrêter le microbe dangereux à son origine que d'attendre qu'il ne se soit répandu dans le sol. La surveillance locale comporte donc deux parties : une partie hydrologique et une partie hygiénique qui demande la collaboration des

médecins locaux. Ces médecins doivent signaler tous les cas de maladies d'origine hydrique dont ils ont connaissance et assurer sous leur propre responsabilité toutes les mesures prophylactiques destinées à détruire les microbes dangereux que les malades peuvent disséminer sur le sol. Ces mesures sont la désinfection des selles, des eaux de bains, des linges souillés, de la literie.

En dehors des selles à désinfecter il arrive que les déjections ayant été jetées sur les fumiers, il faut procéder à la destruction de ces derniers par le feu. D'autre part il existe des malades beaucoup plus dangereux parce qu'ils ne se soignent pas ou se soignent tardivement.

Ce sont les malades atteints de fièvre typhoïde ambulatoire qui répandent des déjections partout où ils passent, car leur état n'est pas suffisamment grave pour qu'ils s'alitent et qu'il faut dépister.

La partie hydrologique comprendra la mise en jeu des diverses méthodes exposées précédemment.

A la suite des observations et des expériences, une fois le périmètre d'alimentation bien défini, on peut se rendre compte de la façon dont chaque émergence se contamine et porter les principaux efforts du service de surveillance sur les régions où les sources sont véritablement dangereuses. Il est des régions où les cimetières, les lavoirs, les fosses d'aisances sont une menace permanente pour la circulation souterraine et les eaux de source. Ce sont ces régions plus particulièrement menacées qu'il faudra éliminer tout

d'abord ; quant aux autres où la menace est moins pressante il faudra, après leur avoir emprunté leurs eaux, les soumettre à la surveillance médicale permanente.

Sur tout le périmètre de la source où de la nappe drainée on doit prohiber le dépôt et le répandage des matières fécales, fumiers, purins, engrais d'origine animale, boues des rues et des villes, ordures ménagères, etc...

On canalisera certains ruisseaux dangereux, on mettra en décharge permanente des sources dont les eaux paraissent trop suspectes en tout temps.

Nous avons vu précédemment que les eaux souterraines pouvaient se souiller au niveau du point d'émergence et que des précautions doivent être prises pour assurer avant tout la parfaite protection des eaux captées contre les pollutions de toutes sortes qui menacent les sources (M. Grandjean. *Annales d'Hygiène*, novembre 1928, p. 611).

En principe le captage doit être opéré en profondeur sous les terrains remaniés, dans la roche en place. Plus le parcours de l'eau est prolongé dans les terrains de surface plus les contaminations sont à craindre ; aussi, en principe, il faut aller la chercher dans la fracture même de la roche qu'elle parcourt pour arriver au jour.

A la fin du siècle dernier, en ce qui concerne plus spécialement les eaux potables, une vive campagne a été menée pour faire collaborer la science hydrogéologique avec l'art de l'ingénieur. Son but était de pro-

fiter de tous les progrès dus à l'avancement de la géologie pour que les eaux potables soient, autant que faire se peut, tenues à l'abri de toutes les contaminations que l'hygiène réprouve.

C'est ainsi que l'on doit, d'une part, rechercher les causes de pollution éloignée pour y remédier par les mesures appropriées, comme l'obturation des bétoures dans les périmètres d'alimentation et, d'autre part, établir les prises d'eau à l'abri de tout soupçon. Le captage doit avoir pour but essentiel de mettre la source à l'abri de toutes les altérations pouvant se produire au voisinage du point d'émergence. Aussi par cette opération, il faut obtenir de l'eau provenant uniquement de la nappe souterraine à l'exclusion des eaux de ruissellement, en particulier des eaux de pluie ou des eaux de surface qui peuvent souiller la source au moment où le trop-plein de la nappe profonde va atteindre le jour.

Dans le cas d'une source d'affleurement, l'ouvrage rationnel de captage doit simplement comprendre une galerie horizontale dont la base se trouve à la partie supérieure de la couche imperméable retenant la nappe. Dans les sources de thalweg l'eau se fera jour généralement à travers une couche d'alluvions garnissant le thalweg et il faudra aller la chercher par un forage-tube ou un puits vertical cimenté jusqu'à son gisement géologique.

Les villes doivent acquérir autour des réceptacles, chambres et autres ouvrages de captage une certaine surface de terrain dont l'accès soit ainsi interdit au

public et à la malveillance. Plus le captage aura été fait profondément et convenablement moins cette nécessité sera impérieuse et moins le périmètre à défendre pourra être étendu.

On appelle drainage le captage d'une nappe souterraine fait au moyen de tranchées creusées à ciel ouvert. Dans le fond de ces tranchées on installe un drain, c'est-à-dire un conduit capable d'attirer et d'écouler les eaux. Ne s'adressant qu'à des nappes peu profondes, donc peu recommandables, il faudra multiplier les précautions pour éviter toute cause de pollution dans le périmètre drainé.

Un bon puits doit descendre et s'encastrent dans la couche imperméable, en second lieu il doit être dans l'impossibilité absolue de recevoir des infiltrations d'eau de surface. Il faut le rendre étanche sur toute la partie située au-dessus du fond de la nappe. Le puits doit être couvert et muni d'une pompe.

Les nappes profondes ont pour l'hygiéniste l'avantage d'être ordinairement bien protégées et c'est là qu'on a le plus de chance de trouver l'eau dans sa pureté la plus parfaite. Elles doivent donc être recommandées d'autant plus que l'eau y a en outre une grande fixité de composition et de température.

Les ouvrages de captation consisteront en puits profonds, forages, galeries de mine ou galeries captantes.

L'eau des nappes profondes est sous pression ou non. Dans le second cas, lorsqu'on l'atteint par un trou vertical, elle y reste au niveau même où on l'a

rencontrée; dans le premier elle s'élève à une certaine hauteur et parfois même déborde et jaillit par l'orifice. Dans le sens vulgaire on n'appelle que puits artésiens que ceux qui débordent; mais il semble que scientifiquement on doive donner ce nom à tout puits qui rencontre de l'eau sous pression.

Les galeries de mines ou galeries captantes constituent un procédé qui va saigner la nappe au cœur. Il doit avoir la préférence sur les puits et sondages dans certains cas où ceux-ci ne pourraient réussir que s'ils étaient par trop multipliés; ainsi, comme dans les calcaires fissurés, une nappe n'est parfois qu'une série de filets coulant dans des fissures assez espacées l'une de l'autre, et il est clair alors qu'un sondage risque de tomber entre deux fissures dans le roc compact et de ne rien donner, tandis qu'une galerie captante recoupant transversalement tous les filets, collectera toute l'eau sur son trajet.

Surveillance des eaux avant de permettre leur utilisation

Si l'on examine les épidémies d'origine hydrique, on peut dire que 90 fois sur 100 la fièvre typhoïde est provoquée par l'ingestion d'une eau contaminée et l'on a vu, à la suite de la récente épidémie de 1928-1929, à Lyon, qui comporta 2.500 cas et 300 décès, la cause hydrique de la fièvre typhoïde faire la base scientifique des débats et la présence du colibacille être même acceptée comme témoin de la pollution des eaux par des excréments de malades; si donc on suit en dehors de toute mesure directe de protection l'allure des épidémies typhiques, on ne peut manquer d'être frappé par le fait que celles-ci s'atténuent d'elles-mêmes, bien que l'eau consommée soit encore largement souillée ⁽¹⁾. L'eau ne sert guère que de véhicule aux germes pathogènes. Ils ne paraissent pas y trouver de conditions biologiques qui les satisfassent. Ils s'y altèrent et y vieillissent. De telle sorte que des eaux suspectes peuvent être absorbées sans répercussion fâcheuse sur l'intestin des consommateurs. L'en-

(1) A. GUILLERD : Notions d'hydrologie appliquée à l'hygiène, p. 46.

semble de ces considérations indique que le vrai danger réside dans le germe frais et virulent passant dans un court délai de l'intestin malade aux eaux alimentaires. Cette fraîcheur du germe est une notion importante. L'objectif sera d'empêcher l'arrivée facile et rapide de ces espèces microbiennes dans les eaux souterraines. Il faudra donc connaître les points où ces contaminations sont possibles, les circonstances, le moment où elles sont susceptibles de s'établir.

La connaissance du terrain est prédominante, c'est elle qui fixera la vie très probable des eaux considérées, leur origine et leur formation, leur mode de circulation et d'émergence, qui nous donnera de fortes présomptions sur le pouvoir filtrant et nitrifiant des sols traversés et partant nous fera prévoir les défaillances que ces eaux peuvent présenter dans leur pureté.

En dehors des renseignements fournis par l'analyse chimique dont il a été parlé précédemment, le pouvoir épurant de l'ensemble de la surface du gisement géologique pourra être caractérisé par les résultats de l'analyse bactériologique. On pourra faire la numération des germes de l'eau par culture sur gélatine à 20° pendant quinze jours.

On compte toutes les espèces microbiennes. Mais des espèces banales peuvent se multiplier dans certaines circonstances dans l'intérieur du sol et ainsi l'augmentation du nombre des germes peut donc tenir à une autre cause qu'à une mauvaise filtration. Il faut donc ne rechercher qu'une seule espèce de germe et

opérer sur une grande quantité d'eau. On fera la numération du bactérium coli. Ce microbe indique en effet qu'il y a des matières fécales ou des matières organiques provenant de corps en décomposition.

L'apparition de ce germe est toujours corrélative à une arrivée d'eau superficielle mal filtrée. Sa recherche et son identification se fait en moins de 48 heures. Il resterait à savoir si le bactérium coli est d'origine humaine ou non ?

Après un séjour prolongé dans l'eau le B. coli est de moins en moins indologène. Or, ce qu'il est utile de connaître, c'est l'arrivée du germe dans un état dangereux pour l'organisme.

Un microbe provenant récemment d'un intestin de malade sera bien plus pathogène que le même ayant séjourné de longues semaines dans une eau où il ne trouve aucun élément pour se développer.

La présence du B. coli très indologène atteste un apport de microbes récemment excrétés par un intestin. Leur apparition fera supposer une arrivée de microbes suspects, comme par exemple le bacille d'Eberth, plus dangereux et plus pathogène.

On tiendra l'eau pour suspecte s'il y a plus de 50 coli par litre.

Les analyses chimiques peuvent trouver leur utilisation dans les examens d'eaux de sources à faible débit. Lorsqu'il s'agit d'expérimenter sur des émergences importantes, les procédés chimiques sont impuissants à déceler une contamination, la dilution de celle-ci étant infiniment plus grande que la sensibilité

des méthodes. Etant donné que ce qu'il est important à connaître, c'est le moment où la contamination se produit ou est possible, il suffit donc d'employer une méthode de signalement. L'emploi de la mesure de la résistivité électrique remplira parfaitement ces conditions. Douée d'une grande sensibilité les résultats sont rapidement obtenus. Les mesures devront être faites quotidiennement car c'est l'ensemble des déterminations qui présentera un intérêt. Il faudra expérimenter par toutes les saisons, en saison sèche et en saison humide. On pourra de la sorte construire un graphique. L'interprétation se fera par rapprochement avec celui de la pluviosité.

La mesure de la résistivité et la recherche régulière du bactérium coli sont les éléments indispensables d'une surveillance méthodique.

CONCLUSIONS

1° L'étude des eaux souterraines s'appuie actuellement sur des analyses physiques dont l'importance est aussi grande que celle des autres analyses employées jusqu'ici.

2° Ces eaux constituent de par leur distance de la surface, des nappes filtrées qui sont à l'abri des contaminations par les eaux de ruissellement.

3° On appréciera leur origine, leur circulation, par la fluorescéine, les variations de leur composition par la résistivité électrique; leur température, qui devra rester constante, par des thermomètres électriques.

4° La question se pose de plus en plus pour toutes les grandes cités de trouver des sources d'alimentation en eau potable capables de fournir à tous les besoins.

5° Il n'est possible de les trouver que dans les nappes souterraines profondes, plus abondantes et plus pures, à condition toutefois de les surveiller.

6° Aussi la collaboration des Services hydrogéologiques et des Services d'hygiène est-elle nécessaire.

VU :

Le Doyen,
BALHAZARD.

VU Bon à imprimer :

Le Président de Thèse,
L. TANON.

VU et PERMIS d'imprimer :

Le Recteur de l'Académie de Paris,
S. CHARLETY.

BIBLIOGRAPHIE

- F. BORDAS et Jean RIVIÈRE. — Paris nouveau. *Annales d'Hygiène*, octobre 1930, p. 541.
- BROUARDEL. — *Traité d'Hygiène*.
- DEBAUVE et IMBEAUX. — *Distribution d'eaux*.
- A. DECHAMBRE. — *Dictionnaire encyclopédique des Sciences médicales*.
- DE LAUNAY. — *Recherche, captage et aménagement des sources thermo-minérales*.
- F. DIÉNERT. — Filtration horizontale d'une eau. *Annales d'Hygiène*, n° 2, février 1931, p. 87.
- M. DIÉNERT. — Trente ans d'activité du service de surveillance des eaux d'alimentation de Paris. *Annales d'Hygiène*, n° 7, juillet 1928, p. 381.
- FRANKLIN. — La vie privée d'autrefois. *L'Hygiène*, tome VII, p. 150.
- M. GRANDJEAN. — Méthodes de captage des eaux douces et des eaux thermo-minérales. *Annales d'Hygiène*, tome VI, novembre 1928, p. 641.
- A. GUILLERD. — *Notions d'Hydrologie appliquées à l'hygiène*. 1923.
- Les qualités organoleptiques de l'eau : fraîcheur, odeur, saveur, et leur correction. *Annales d'Hygiène*, n° 8, août 1929, p. 445.
- IMBEAUX. — *Essai d'Hydrogéologie*, 1930 (préface).

- E.-A. MARTEL. — *Nouveau Traité des eaux souterraines. Les Abîmes, La France ignorée.*
- R. NEVEU. — L'aménagement de Rome en eau potable dans l'antiquité. *Pro Médico*, 1927, n° 4.
- L. TANON. — *Précis d'Hygiène*, 1929, tome I, p. 39.
- J. SALMON. — *Annales d'Hygiène*, mars 1930, p. 140.
-

